

文章编号: 1000-5862(2017)06-0641-04

斜入射时平板吸波材料电磁参数匹配规律研究

张海丰, 李 颖, 王东方*, 程汉池, 李 岚, 韩海生

(佳木斯大学理学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要: 利用传输线理论推导出了电磁波斜入射时满足广义匹配规律的后向反射率公式, 并应用 3 维网格法对单层平板吸波材料的吸波性能进行了分析. 分析结果表明: 在 1 ~ 18 GHz 带宽内, 当 $\theta_1 < 65^\circ$, $\mu_{r1} > 1$, $\varepsilon_{r1} < 35$, $1 < M_1 < 6$ 时, 后向反射率均能满足当前部分军事和民用中对于材料吸波性能的要求, 同时该理论分析和网格法设计将对实际材料的应用设计具有方向性的指导作用.

关键词: 斜入射; 吸波材料; 广义匹配规律

中图分类号: TN 972.44 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.06.17

0 引言

平板吸波材料是能够有效地吸收入射电磁波的一类功能材料, 它能够使后向反射波强度显著衰减. 由于其高效的吸波性能, 在军事隐身和民用领域得到国内外科研机构的广泛研究^[1-15]. 在理论研究方面, 目前国内外主要集中在电磁波垂直入射到材料表面的情况^[16-19], 其研究主要从电磁波垂直入射的情况出发, 对吸波材料的一般匹配规律和广义匹配规律的进行了研究. 结果表明: 通过采用特殊的边界条件以达到与空气的阻抗相匹配, 以及使用电磁损耗材料均能得到良好的吸波效果.

本文将对电磁波斜入射时的情况进行具体的讨论, 推导出满足广义匹配规律^[16]的功率反射率公式, 并讨论了匹配常数 M 与 R_p 、 d 、 ε_r 、 μ_r 的关系, 进而为实验材料的设计与应用提供方向性的指导.

1 斜入射时满足广义匹配规律的反射率公式的推导

如图 1 所示, 设某一频率的电磁波以角度 θ_0 斜入射到厚度为 d 的有金属衬底的平板材料表面, 并且设材料内部的折射角为 θ_1 , 材料的法向阻抗为 Z_1 .

根据传输线理论^[20], 平板材料中的法向阻抗 Z_1 为电场的切向分量与磁场的切向分量之比, 并且对

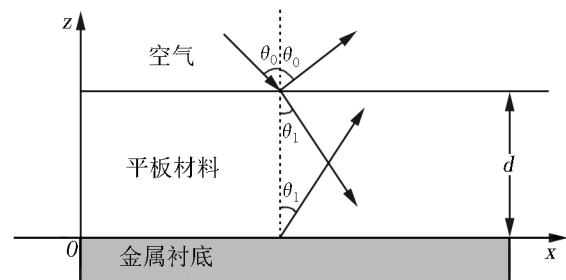


图 1 电磁波在损耗介质中的传输

于 E 垂直入射面的情形有 $Z_1 = \frac{1}{\cos \theta_1} Z'_0 \sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}}$,

对于 H 垂直入射面的情形有 $Z_1 = \cos \theta_1 Z'_0 \sqrt{\mu_{r1}/\varepsilon_{r1}}$, 其中 Z'_0 为空气中的阻抗.

本文只讨论电磁波在 E 垂直入射面的情形下的反射. 根据折射率关系, 电磁波在平板材料上表面的折射应该满足折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0$, 其中 $n_1 = \sqrt{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}}$, $n_0 = 1$ 分别为上下介质的相对折射率, ε_{r1} 和 μ_{r1} 分别为平板材料的相对介电常数和相对磁导率, 且 $\varepsilon_{r1} = \varepsilon'_{r1} - i\varepsilon''_{r1}$, $\mu_{r1} = \mu'_{r1} - i\mu''_{r1}$, 于是可得 $\cos \theta_1 = (1 - \sin^2 \theta_0 / (\varepsilon_{r1}\mu_{r1}))^{1/2}$.

为了讨论问题方便, 先推导有金属衬底的单层介质情况. 众所周知, 电磁波与介质相互作用时, 反射系数为^[4] $R_1 = |(Z_{1in} - Z_0) / (Z_{1in} + Z_0)|$, 其中 Z_{1in} 为介质层的输入阻抗, 而且 $Z_{1in} = Z_2 \tanh(ik_2d)$, Z_0 为空气中的法相阻抗. 根据文献^[16], 广义匹配规律下材料的电磁参数之间的关系

收稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51141009), 黑龙江省教育厅科学技术研究面上项目(12521526), 佳木斯大学科学技术研究面上项目(Lz2013-017)和黑龙江省学生创新创业(2012sj019)资助项目.

通信作者: 王东方(1973-), 女, 黑龙江大庆人, 副教授, 主要从事电磁损耗材料的研究. E-mail: 103096895@qq.com

为 $\varepsilon'_1/\varepsilon''_1 = \mu'_1/\mu''_1 = M_1$. 同时电磁波在损耗材料中传播时的波矢量为 $k_1 = k'_1 - ik''_1$, 其中 k'_1, k''_1 分别为

$$k'_1 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}, \quad k''_1 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1} M_1.$$

因此 $k_1 = k'_1 - ik''_1 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1} (1 - iM_1)$, 于是

$$Z_{in} = Z_1 \tanh(ik_1 d) = Z_0 \frac{1}{\cos \theta_1} \sqrt{\mu'_1/\varepsilon'_1} \tanh(i \frac{2\pi f d}{c} \cdot$$

$(1 - iM_1) \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}$), 这样将该式代入反射率公式可得

$$R_1 = \left| \left(\frac{1}{\cos \theta_1} \sqrt{\mu'_1/\varepsilon'_1} \tanh(i \frac{2\pi f d}{c} (1 - iM_1) \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}) - 1 \right) / \right. \\ \left. \left(\frac{1}{\cos \theta_1} \sqrt{\mu'_1/\varepsilon'_1} \tanh(i \frac{2\pi f d}{c} (1 - iM_1) \sqrt{\varepsilon'_1 \mu'_1}) + 1 \right) \right|,$$

相应的功率反射率可以表示为 $R_{p1} = 20 \lg(R_1)$.

对于有金属衬底的多层平板材料的情况, 根据文献[16]可以得到, 广义匹配规律满足 $\varepsilon''_{rj}/\varepsilon'_{rj} = \mu''_{rj}/\mu'_{rj} = M_j$, 其中 $j = 1, 2, \dots, n$ 表示第 n 层平板材料, 则多层结构的平板材料的输入阻抗和后向反射率可以表示为

$$Z_{in} = \frac{Z_{(n-1)in} + Z_n \tanh(ik_n d_n)}{Z_n + Z_{(n-1)in} \tanh(ik_n d_n)} Z_n,$$

$$R_n = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|,$$

其中 $Z_n = Z_0 \frac{1}{\cos \theta_n} \sqrt{\mu'_n/\varepsilon'_n}$, $k_n = k'_n - ik''_n =$

$$\frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon'_n \mu'_n} (1 - iM_n).$$

2 后向反射率与各个参数的匹配关系讨论

为了讨论电磁波斜入射时电磁参数、材料厚度、入射角度、匹配常数等对后向反射率的影响, 根据推导的反射率公式, 采用3维网格法绘制了图2~图9, 即参数 $\theta_1, M_1, d, \varepsilon_{r1}, \mu_{r1}$ 等与后向反射率 R_p 的关系曲线.

1) 从图2和图3可以看出, 在1~18 GHz整个带宽内, 对于某一角度的入射波, 后向反射率变化不大; 随着厚度 θ_1 的增大, R_p 迅速下降并快速趋于0, 然而在 $\theta_1 < 65^\circ$ 时, 在1~18 GHz的带宽内仍然可以获得大于5 dB的后向反射率. 其中 $M_1 = 2$, $d = 4 \text{ mm}$, $\varepsilon_{r1} = 15$, $\mu_{r1} = 2$.

2) 从图4和图5可以看出, 在1~18 GHz整个带宽内, 除低频外, 对于某一 μ_{r1} 的取值, 后向反射率变化不大; 随着 μ_{r1} 取值的增大, 在1~18 GHz整个带宽内, 后向反射率几乎呈线性的增长, 当 $\mu_{r1} > 1$

时可以获得大于7 dB的后向反射率. 其中 $M_1 = 2$, $d = 4 \text{ mm}$, $\theta_1 < 30^\circ$, $\varepsilon_{r1} = 15$.

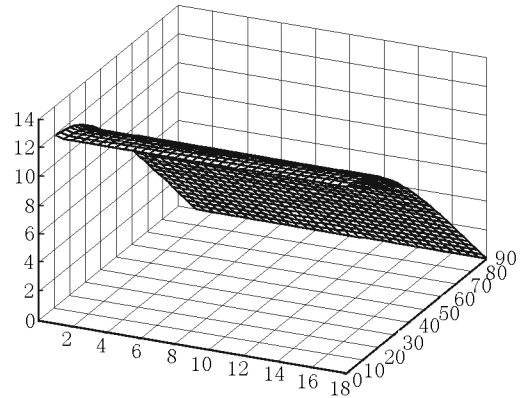


图2 斜入射时 R_p 与 f, θ_1 的关系曲线

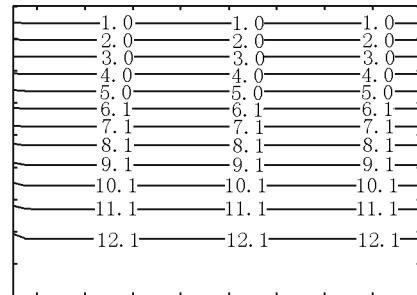


图3 斜入射时 R_p 与 f, θ_1 的等高线

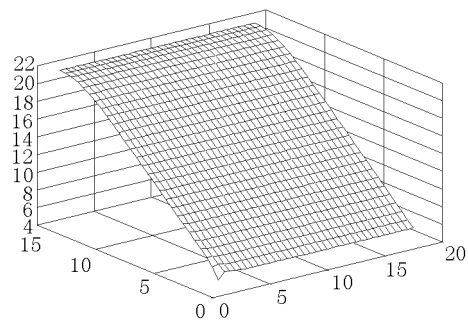


图4 斜入射时 R_p 与 f, μ_{r1} 的关系曲线

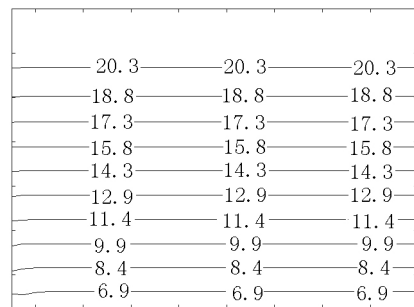


图5 斜入射时 R_p 与 f, μ_{r1} 的等高线

3) 从图6和图7可以看出, 当 $\varepsilon_{r1} < 35$ 时, 在1~18 GHz频段内后向反射率均大于5 dB, 且对于某一确定的 ε_{r1} 值, 在整个频段内后向反射率几乎是

一致,只有在 $\varepsilon_{r1} < 10$ 时,在 $1 \sim 3$ GHz 内后向反射率略有下降. 其中 $M_1 = 2$, $d = 4$ mm, $\theta_1 < 30^\circ$, $\mu_{r1} = 2$.

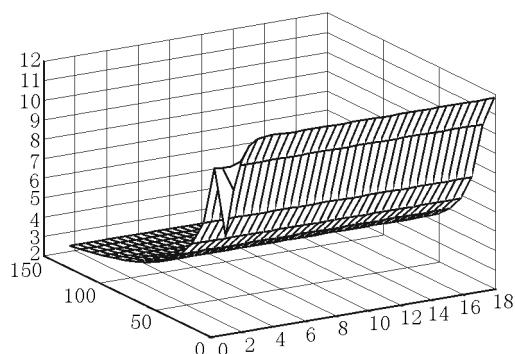


图6 斜入射时 R_p 与 f, ε_{r1} 的关系曲线

4) 从图8和图9可以看出,随着 M_1 的增加,在整个 $1 \sim 18$ GHz 频段内后向反射率变化出现震荡;随着频率的增加震荡趋于减弱,在振荡消失的区域内后向反射率均可达到 13 dB;在 2.0, 4.2, 7.0 GHz 等频率附近,随着 M_1 的增加,后向反射率逐渐变小;在 1.0, 3.2, 6.0, 8.5 GHz 附近,随着 M_1 的增加,后向反射率逐渐增加并出现峰值,最大的峰值达到将近 28 dB. 其中 $d = 4$ mm, $\theta_1 = 30^\circ$, $\mu_{r1} = 2$, $\varepsilon_{r1} = 15$.

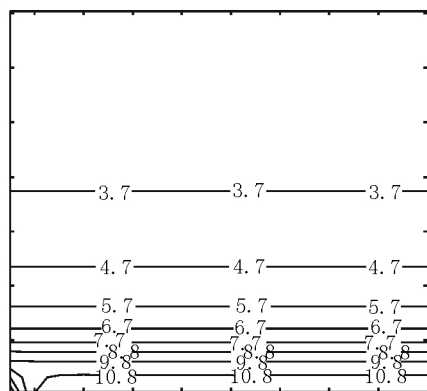


图7 斜入射时 R_p 与 f, ε_{r1} 的等高线

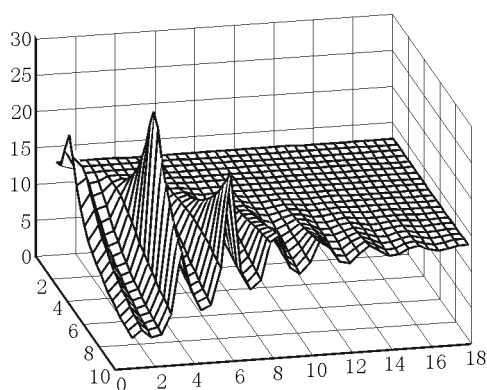


图8 斜入射时 R_p 与 f, M_1 的关系曲线

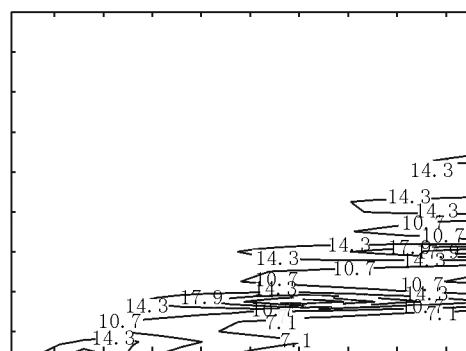


图9 斜入射时 R_p 与 f, M_1 的等高线

3 结论

通过利用传输线理论推导出的电磁波斜入射时满足广义匹配规律的后向反射率公式可以看出,入射角对后向反射率的大小有较大的影响,在 $1 \sim 18$ GHz 整个带宽内,随着入射角的增大,后向反射率迅速下降并很快趋于 0,在 $\theta_1 < 65^\circ$, $\mu_{r1} > 1$, $\varepsilon_{r1} < 35$, $1 < M_1 < 6$ 时,均能获得大于 5 dB 的后向反射率,体现出材料对电磁波有很好的吸收作用,能够满足当前部分军事和民用中 5 dB 衰减值的要求.

4 参考文献

- [1] Li Ning. Enhanced microwave absorbing performance of CoNi alloy nanoparticles anchored on a spherical carbon monolith [J]. Phys Chem Chem Phys, 2013, 15 (20): 7685-7689.
- [2] Wang Li. Preparation and microwave absorbing properties of carbon/cobalt ferromagnetic composites [J]. J Nanosci Nanotechnol, 2013, 13 (2): 793-798.
- [3] Chambers B. Optimum design of a salisbury screen radar absorber [J]. Electro Lett, 1994, 30 (16): 1353-1354.
- [4] Tian Xia. Hydrogenated TiO₂ nanocrystals: a novel microwave absorbing material [J]. Adv Mater, 2013, 25 (47): 6905-6910.
- [5] Jung J Y. Wavelength-selective infrared salisbury screen absorber [J]. Appl Opt, 2014, 53 (11): 2431-2436.
- [6] Zhang Xian. Thermal conversion of an Fe₃O₄ metal organic framework: a new method for an efficient Fe-Co/nanoporous carbon microwave absorbing material [J]. Nanoscale, 2015, 7 (30): 12932-12942.
- [7] Ni Qianqian. One-dimensional carbon nanotube barium titanate polyaniline multi hetero structures for microwave absorbing application [J]. Nanoscale Res Lett, 2015, 10: 170.

- 174.
- [8] 步文博,徐杰,丘泰.吸波材料基础理论的探讨及展望[J].江苏陶瓷,2001,34(2):1-4.
- [9] 李艳,邹黎明,王依民.隐身材料的研究现状与发展趋势[J].合成纤维,2002,31(5):16-18.
- [10] 张卫东,冯小云,孟秀兰.国外隐身材料研究进展[J].宇航材料工艺,2000,30(3):1-4.
- [11] 施冬梅,邓辉.雷达隐身技术的发展[J].兵器材料科学与工程,2002,25(1):64-67.
- [12] 王国强,邹勇,康勤红.国外新型隐身材料的研究现状和发展方向[J].荆州师范学院学报,2000,23(2):51-64.
- [13] 孟繁文,杨觉明,严文.纳米复合隐身材料[J].西安工业学院学报,1999,19(4):324-328.
- [14] 彭艳萍.飞机隐身技术及隐身材料[J].航天学报,1999,20(3):287-288.
- [15] 杨雪,王源升.舰艇隐身材料的现状及发展趋势[J].海军工程大学学报,2000(5):73-76.
- [16] 张海丰,周忠祥,秦柏,等.“广义匹配规律”在多涂层吸波材料设计中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1140-1143.
- [17] 张海丰,崔虹云,关慧君,等.网格法在抗电磁辐射材料电磁参数匹配研究中的应用[J].黑龙江工程学院学报,2011,25(2):74-80.
- [18] 张海丰,崔虹云,周忠祥,等.Salisbury屏电磁参数匹配特性及其在抗电磁辐射中的应用研究[J].信阳师范学院学报,2011,24(2):265-267.
- [19] 秦汝虎,秦柏,田春亮,等.吸波材料设计中的全貌分析方法[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(5):579-583.
- [20] 布列霍夫斯基赫.分层介质中的波[M].北京:科学出版社,1960:30-52.

The Study on the Electromagnetic Matching Laws of Absorbing Materials at the Oblique Incidence of Electromagnetic Wave

ZHANG Haifeng, LI Ying, WANG Dongfang*, CHENG Hanchi, LI Lan, HAN Haisheng
(College of Natural Science, Jiamusi University, Jiamusi Heilongjiang 154007, China)

Abstract: The formula of power reflectivity following the generalized matching laws of multi-layer absorbing coatings is deduced by using the theory of transmission line at the oblique incidence of electromagnetic wave. Through the application of the three dimensional grid methods, the absorbing performance research for the single-layer absorbing material is analyzed. The analysis results show that, within the bandwidth from 1 to 18 GHz, $\theta_1 < 65^\circ$, $\mu_{r1} > 1$, $\epsilon_{r1} < 35$, and $1 < M_1 < 6$, the value of reflectivity can meet the requirements for the absorbing performance of materials in the current fields of military and civilian. At the same time, the theoretical analysis and the grid method in this paper will play a directional guidance role for the actual material designs and applications.

Key words: oblique incidence; absorbing material; generalized matching law

(责任编辑:冉小晓)